

水蚀风蚀交错区黄土抗剪强度敏感性分析

郭文召, 刘亚坤, 徐向舟, 唐小微, 李 涛, 刘桢义, 宋国栋

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘 要:抗剪强度不仅是黄土重要的力学性质指标,还是控制重力侵蚀的内在因素。利用直剪仪进行快剪试验,研究干密度和含水量对黄土抗剪强度的影响,并用基于变量增长率的敏感性分析方法,对抗剪强度的影响因素进行了敏感性分析。结果表明:干密度是通过影响粘聚力和内摩擦角来影响抗剪强度的,而含水量仅仅通过影响粘聚力来影响抗剪强度。含水量对粘聚力的影响呈指数函数减小,而对内摩擦角影响很小,含水量对粘聚力的影响程度是其对内摩擦角的 18.5 倍。黄土抗剪强度对干密度的敏感性大于它对含水量的敏感性,前者的敏感系数是后者的 10 倍。可为黄土沟坡重力侵蚀的力学机理分析提供参考依据。

关键词:抗剪强度;干密度;含水量;敏感性分析;重力侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)03-0023-06

Sensitivity on Shear Strength of the Loess in the Ecotone of Wind-Water Erosion

GUO Wenzhao, LIU Yakun, XU Xiangzhou, TANG Xiaowei, LI Tao, LIU Zhenyi, SONG Guodong

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The shear strength is not only an important mechanical index of the loess, but also a significant factor associated with gravity erosion. We carried out a series of quick direct shear tests on the remolded loess samples, and then evaluated the sensitivity on the shear strength of the dry density and moisture content using the increase-rate-analysis method. The experimental results reveal that the dry density could markedly affect the shear strength with changes in the cohesive force and internal friction angle, while the moisture content might markedly influence the shear strength with changes in the cohesive force. In addition, the influence of the moisture content on the internal friction angle was small, but that on the cohesive force was obvious. The cohesive force decreased with the increase of the moisture content at an exponential rate. On the other hand, the effect of the cohesive force on the water content was about 18.5 times higher than that on the internal friction angle. Moreover, the sensitivity parameter on the shear strength of the dry density was much larger than that of the moisture content, and the sensitivity of the former was 10 times that of the latter. The results can provide an insight into the mechanics mechanism and process of gravity erosion on the steep loess slope.

Keywords: shear strength; dry density; moisture content; sensitivity analysis; gravity erosion

水蚀风蚀交错区地处黄土高原北部,是黄土高原水土流失最为严重的地区,也是黄河中下游河道粗泥沙的主要来源区。该区处于第四纪抬升中心,区内新构造运动活跃,滑坡、崩塌等重力侵蚀发生频繁,为汛期沟道泥沙输移提供了大量的物质来源^[1]。六道沟小流域位于该交错区的强烈侵蚀中心,水蚀、风蚀、重力侵蚀全年交替叠加进行^[2]。3 种侵蚀营力交互作用,一方面互相提供了侵蚀的物质源,另一方面加重

了土壤侵蚀的强度,然而 3 种侵蚀营力交互作用下的黄土的力学性质尚不明确。此外,土壤的岩土力学性质与土壤侵蚀密不可分^[3],是控制重力侵蚀的内在因素。抗剪强度是表征土壤力学性质的一个主要指标,其大小直接反映了土壤在外力作用下发生剪切变形破坏的难易程度。而土壤含水量和干密度是影响土壤抗剪强度的两个重要因素。因此,研究该地区黄土抗剪强度的水敏感性特征以及干密度对土壤抗剪强

收稿日期:2017-07-23

修回日期:2017-09-01

资助项目:国家重点研发计划(2016YFC0402504);国家自然科学基金项目(51479022);长江水利委员会长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016388/KY)

第一作者:郭文召(1987—),男,河南洛阳人,博士研究生,研究方向:水土保持。E-mail:wenzhaoguo@mail.dlut.edu.cn

通信作者:徐向舟(1969—),男,浙江省龙游人,博士,教授、博士生导师,主要研究方向:水土保持、水环境治理等。E-mail:xzxu@dlut.edu.cn

度的影响,对研究水蚀风蚀交错区的重力侵蚀灾害发育规律、发生机理,减轻该地区水土流失和保护区域生态地质环境等方面具有重要意义。

粘聚力和内摩擦角是土的 2 个重要抗剪强度指标,主要受土体的种类、含水量^[4]和干密度^[5]等因素影响。党进谦等^[6]通过分析非饱和黄土的结构强度和抗剪强度,发现当含水量增大时,其抗剪强度迅速降低,并得到结构强度与初始含水量之间的幂函数关系式。Zhong 等^[7]通过研究含水量对黄土抗剪强度的影响,发现非饱和黄土的抗剪强度比饱和黄土的抗剪强度大。上述研究主要考虑含水量对抗剪强度的影响,尚未涉及其他影响因素。张文毅等^[8]通过直剪快剪试验分析了重塑黄土在不同含水量和干密度下的抗剪强度特性,发现含水量与干密度是影响重塑超固结黄土抗剪强度的重要因素。褚峰等^[9]通过分析天然干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征的影响,研究得知同一含水量下、原状非饱和黄土的吸力随着天然干密度的增大而增大。但研究中并没有定量分析含水量和干密度对土壤抗剪强度的影响程度,也没有分析出含水量和干密度这两个因素哪个因素对土壤抗剪强度的影响程度更大。而且,已有研究多是针对黄土高原南部水蚀地区的黄土进行的研究,对水蚀风蚀交错区的黄土的研究则较少。

鉴此,本文以黄土高原六道沟小流域的黄土为例,利用直剪快剪试验研究干密度和含水量对黄土抗剪强度及其相关参数(粘聚力和内摩擦角)的影响。把该区黄土的抗剪强度与黄土高原南部水蚀地区的黄土的抗剪强度进行比较,分析它们的差异性。然后采用基于变量增长率的敏感性分析方法,定量分析土壤抗剪强度对含水量和干密度的敏感程度,并且对影响因素的重要性进行定量分析和比较,进一步探讨含

水量和干密度这两个因素哪个因素对土壤抗剪强度的影响程度更大。

1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县六道沟小流域(38°46′—38°51′N,110°21′—110°23′E)。六道沟小流域是典型的半干旱区,地处毛乌素沙漠边缘,水蚀、风蚀、重力侵蚀全年交替叠加进行,属于黄土高原强烈侵蚀中心^[2]。该流域面积 6.9 km²,集中了黄土高原水蚀风蚀带、农牧过渡带、黄土沙地过渡带,“三带”特色极为明显。千沟万壑的地形、植被稀疏以及黄土的易碎特性导致崩塌、滑坡、泥石流等重力侵蚀十分频繁^[10-12]。多年平均降雨量 437.4 mm,其中 6—9 月降水量占全年降水量的 77%^[13]。该地区降雨强度大,历时短,多以大雨或暴雨的形式发生,加之重力侵蚀和风蚀为水蚀提供了大量的松散泥沙,流域内土壤侵蚀严重,产沙量高。

2 材料与方法

试验用土取自六道沟小流域某陡峭的黄土沟坡,取土深度为 20~30 cm。该黄土陡坡面土壤侵蚀的一个重要特点是水蚀与风蚀强烈的交互作用,在同一空间同时出现或在一年内交替出现水蚀、风蚀及重力侵蚀过程。为保证土样的均一性,取样时遵循同一时间,同一深度的原则。随机选取 22 个不同位置的样点,用环刀取其土样。然后用环刀法来测量沟坡黄土的干密度(样品数为 22 个),用烘干法来测量黄土的质量含水量(样品数为 8 个),用筛分法和沉降法相结合的方法来确定土壤粒径的分布(样品数为 2 个)。黄土基本理化性质结果见表 1。试验黄土中值粒径为 0.11 mm,其中粒径大于 0.05 mm 的砂粒占 68.4%。

表 1 试验黄土物理性质

位置	干密度	降雨前含水量	降雨后含水量	粒径/mm 组成及含量百分数/%		
	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\omega_1/\%$	$\omega_2/\%$	<0.005	0.005~0.05	>0.05
六道沟黄土	1.47~1.66	9.3~13.6	19.2~21.6	1.6	30.0	68.4

试验土壤的含水量控制方法如下。首先,将土样用橡皮锤碾散,并过 2 mm 孔径的筛,并用烘干法测量土样的初始含水量 ω_0 。根据以下公式计算制样所需的土量和加水量,用精度为 0.001 g 的电子天平测量黄土和纯净水的质量,然后将黄土和纯净水均匀搅拌后装入容器内密封,润湿 24 h,从而配制不同含水量 ω 的土样。制样所需的土量 m_0 按下式计算:

$$m_0 = (1 + 0.01\omega_0) \rho V \quad (1)$$

式中: ω_0 为土样初始含水量 13.3%; ρ 为土样干密度; V 为环刀容积。制样所需的加水量 m_w 按下式计算:

$$m_w = \frac{m_0}{1 + 0.01m_0} \times 0.01(\omega - \omega_0) \quad (2)$$

式中: m_0 为制样所需的土量; ω 为制样要求的含水量。

采用已知含水量的土壤配置一定干密度的土样。根据设计的干密度和所用环刀的容积,计算某一干密度对应的土壤质量。将一定质量的土样倒入装有环刀的压样器内,用专门的加载设备把土样在压样器中压实,从而得到所需干密度为 ρ 的试样。最后,对于饱和试样,本文采用抽气饱和法进行饱和,将装有试样的饱和器放入真空锅内并静置 10 h 以上,使试样充分饱和。

在实验室内进行两种方案的试验:(1)控制含水量为 20%,研究干密度变化(1.45,1.55,1.65,1.75 g/cm³)对黄土抗剪强度的影响;(2)控制干密度为 1.45 g/cm³,研究含水量变化(13.3%,16.0%,18.0%,20.0%,22.0%,24.0%,26.0%及饱和含水量)对黄土抗剪强度的影响。本文测得饱和含水量为 31.8%。在不同的垂直压力(50,100,200,300 kPa)下,采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪进行快剪试验,剪切时间 3~4 min。所用环刀内径为 61.8 mm,高度为 20 mm。按照《土工试验规程》^[14]选取剪应力与剪切位移关系曲线上的峰值点或稳定值作为抗剪强度,如无明显峰值点则取剪切位移等于 4 mm 对应的剪应力作为抗剪强度。

采用基于变量增长率的敏感性分析方法来评价抗剪强度对干密度和含水量变化的敏感性^[15]:

$$S=\frac{(y_{i+1}-y_i)\times x_i}{(x_{i+1}-x_i)\times y_i}$$

(3)

式中: x_i 为影响因素初始值; x_{i+1} 为变化后的影响因素值; y_i,y_{i+1} 分别为与 x_i,x_{i+1} 对应的抗剪强度值。抗剪强度对于某影响因素的敏感系数 S 为抗剪强度的增量与某影响因素的增量的比值,是一个无量纲数值。此公式适用于对不同量纲数值(不同单位)影响因素敏感性的比较。

3 结果与分析

3.1 干密度和含水量对黄土抗剪强度的影响分析

不同垂直压力下黄土的抗剪强度随干密度的变化规律见图 1。在相同的垂直压力下,黄土的干密度越大,抗剪强度越大(图 1A)。当垂直压力较低(50 kPa,100 kPa)时,曲线比较平缓;垂直压力较高(200 kPa,300 kPa)时,曲线比较陡,说明高垂直压力时抗剪强度对干密度的变化比低垂直压力时抗剪强度对干密度的变化更敏感。粘聚力和内摩擦角都随土壤干密度的增加而增加,且粘聚力的增加幅度更明显,见图 1B、C 所示。当干密度从 1.45 g/cm³ 增加到 1.75 g/cm³ 时,粘聚力从 19.0 kPa 增加到 36.7 kPa,增加了 93.2%,而此时内摩擦角从 21.1°增加到 28.8°,仅增加了 36.5%。

抗剪强度随含水量的变化关系曲线见图 2,含水量 ω 对抗剪强度 τ 的减小作用主要体现在:粘聚力 c 呈指数函数减小,而对内摩擦角 φ 影响很小。由图 2A 可知,粘聚力随含水量的增大而减小,曲线呈现出一阶指数衰减关系,其相关系数为 0.95。含水量对粘聚力的消减作用是十分明显的。黄土含水量从 13.3%增加到 31.8%时,粘聚力从 24.9 kPa 减小到

6.1 kPa,下降 77.5%,但内摩擦角随含水量的增大只有微小的变化,可以认为是一个常数(均值 21.1°,见图 2B)。因此含水量对粘聚力的消减作用比对内摩擦角的消减作用大。随含水量的增加,黄土的抗剪强度逐渐下降(见图 2C)。在低含水量范围内,抗剪强度的变化速度比在高含水量范围内时的变化速度快。基于粘聚力 c 随含水量 ω 的变化关系进行回归分析获得的回归方程可表达为:

$$c(\omega)=62.06e^{-0.07\omega}$$

(4)

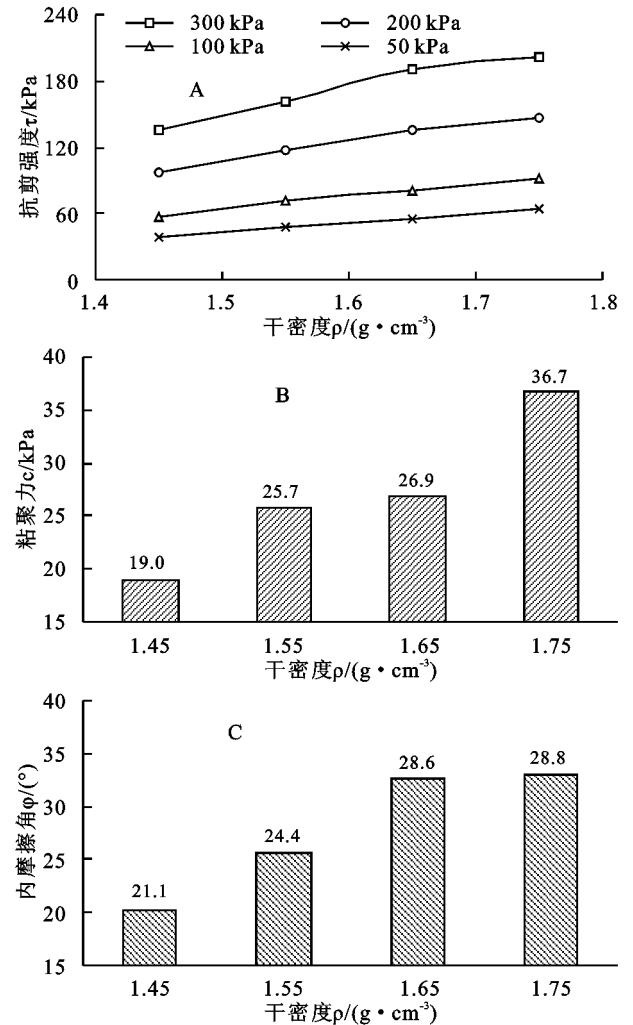


图 1 黄土抗剪强度及参数随干密度的变化

3.2 粘聚力和内摩擦角对含水量和干密度的敏感性

利用变量增长率的敏感性分析方法来评价粘聚力和内摩擦角对含水量和干密度的敏感程度,其敏感性分析结果见表 2 和表 3。从表中可知,粘聚力对干密度和含水量的敏感系数均值分别为 4.18 和 -0.74,内摩擦角对干密度和含水量的敏感系数均值分别为 2.20 和 -0.04。抗剪强度参数对干密度的敏感性呈正相关性,而对含水量的敏感性呈负相关性。粘聚力对干密度的敏感系数大于粘聚力对含水量的敏感系数,前者基本是后者的 5.6 倍;内摩擦角对干密度的敏感系数

大于其对含水量的敏感系数,前者基本是后者的 55 倍。也就是说,与干密度因素相比,含水量对内摩擦角的影响很小,可以忽略不计,这与本文 3.1 节得出的结论一致。另一方面,干密度对粘聚力的影响大于其对内摩擦角的影响,前者的影响基本是后者的 2 倍;同样的,含水量对粘聚力的影响也大于其对内摩擦角的影响,前者的影响是后者的 18.5 倍。

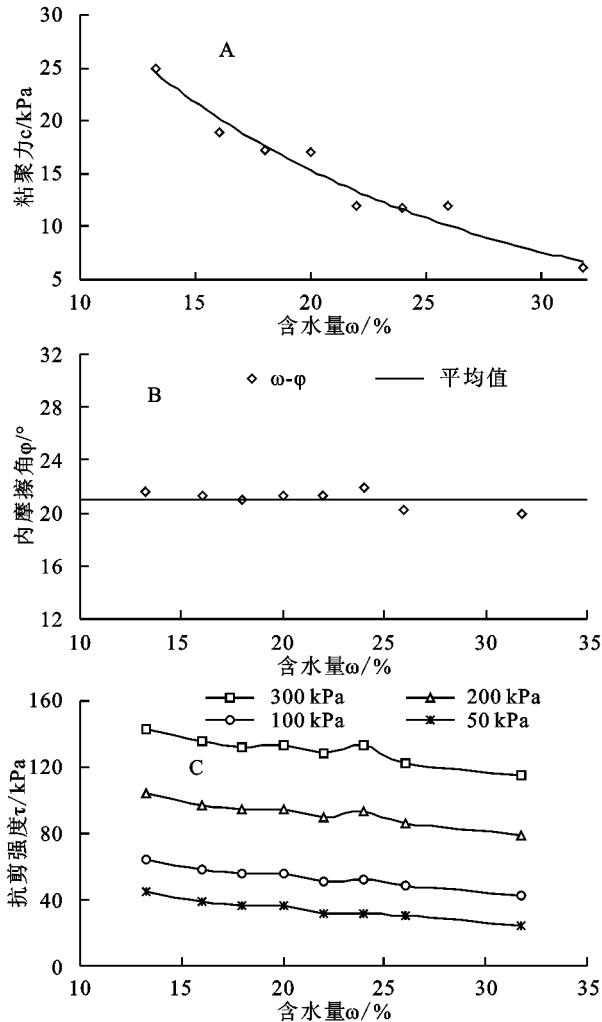


图 2 黄土抗剪强度及参数随含水量的变化

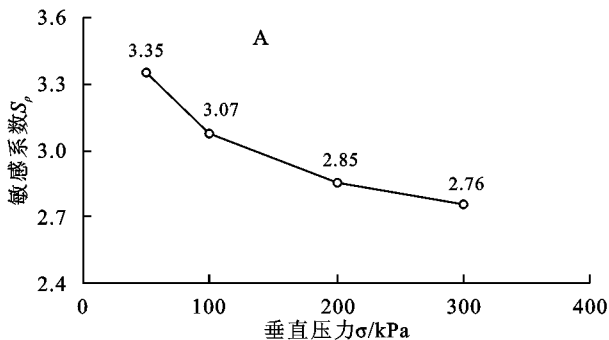


表 2 抗剪强度参数对干密度的敏感性分析					
干密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	粘聚力 $c/$ (kPa)	敏感 系数 S	干密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	敏感 系数 S
1.45	19.0	—	1.45	21.1	—
1.55	25.7	5.09	1.55	24.4	2.25
1.65	26.9	2.98	1.65	28.6	2.57
1.75	36.7	4.48	1.75	28.8	1.77

综上,干密度和含水量的变化都会对粘聚力产生显著的影响。干密度的变化对内摩擦角产生一定影响,而含水量变化对内摩擦角的影响很小。干密度是通过影响粘聚力和内摩擦角来影响抗剪强度,而含水量仅仅通过影响粘聚力来影响抗剪强度。

表 3 抗剪强度参数对含水量的敏感性分析					
含水量 $\omega/\%$	粘聚力 $c/(\text{kPa})$	敏感 系数 S	含水量 $\omega/\%$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	敏感 系数 S
13.3	24.9	—	13.3	21.6	—
16.0	18.9	-1.17	16.0	21.3	-0.06
18.0	17.2	-0.86	18.0	21.1	-0.07
20.0	16.9	-0.63	20.0	21.3	-0.03
22.0	12.0	-0.78	22.0	21.3	-0.02
24.0	11.8	-0.65	24.0	21.9	0.02
26.0	12.0	-0.54	26.0	20.3	-0.06
31.8	6.1	-0.54	31.8	20.0	-0.05

3.3 抗剪强度对含水量和干密度的敏感性

干密度和含水量都是影响土壤抗剪强度的重要因素。为了研究干密度和含水量等因素对抗剪强度的影响程度,现对这些因素进行敏感性分析。结果见图 3A 和图 3B 所示。抗剪强度对干密度的敏感系数为 2.76~3.35,抗剪强度对含水量的敏感系数为 -0.43~-0.16。总体来说,抗剪强度对干密度的敏感性均大于抗剪强度对含水量的敏感性,前者的敏感性基本是后者的 10 倍。另一方面,抗剪强度对干密度和含水量的敏感系数绝对值都随垂直压力的增大而减小。

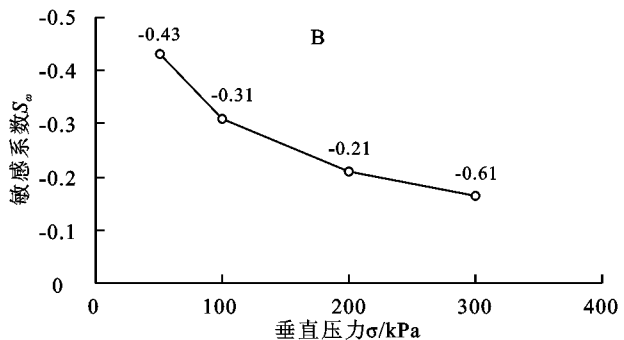


图 3 敏感系数 S_ρ 与垂直压力 σ 关系曲线

4 讨论

含水量在 22%~26% 范围时,本研究通过室内

直剪试验获得的重塑黄土的粘聚力范围与肖培青等^[16]通过直剪试验研究得出的原状黄土的粘聚力基本一致,其试验区亦为六道沟小流域,但我们的重塑

黄土的内摩擦角比肖培青等^[16]得出的原状黄土的内摩擦角值略偏小。这是因为重塑黄土由于结构强度遭到破坏,导致内摩擦角的偏小。此外,通过对本文中六道沟黄土的抗剪强度试验结果与文献^[6]中黄土高原南部水蚀地区杨凌的黄土抗剪强度的观测结果进行对比分析发现:两者摩擦角基本一致,但前者(六道沟黄土)的粘聚力明显比后者(杨凌的黄土)偏小,平均只有后者的48%。本文试验方法与文献^[6]的试验方法一样,都为重塑黄土的直剪快剪试验,土样的含水量和干密度的条件也相似。可以从以下2个方面来解释粘聚力的差异:(1)六道沟的黄土和杨凌的黄土粒径组成不同。六道沟的黄土主要以粒径大于0.05 mm的砂粒为主,粉粒和黏粒很少。杨凌的黄土以粉粒为主,粗颗粒含量较少。(2)两者的胶结类型不同。六道沟黄土的胶结物呈薄膜状,胶结类型为接触式;杨凌的黄土呈现团聚状的胶结物,胶结类型为基底式^[17]。

含水量的变化对粘聚力产生较大的影响,尤其当土壤的含水量较小时(13.3%~16.0%),粘聚力对含水量的敏感系数绝对值较大($S=-1.17$)(见表3)。此时,粘聚力对含水量的敏感系数和粘聚力对干密度的敏感系数还处于同一数量级。当含水量超过一定值时,含水量的变化仍然对土壤的抗剪强度产生一定影响,但抗剪强度和粘聚力对高含水量的变化不再敏感。这是抗剪强度对含水量的敏感系数偏小的一个原因。由于黄土中黏土矿物和有机质为非水稳性胶结物质,仅在干燥状态具有较弱的胶结作用^[18],在较高含水状态下时,黄土中的易溶盐溶解,土体结构破坏,结构强度基本消失。王中文等^[19]和 Adekalu 等^[20]的研究也认为土壤处于低含水量时,若含水量增大,则抗剪强度和粘聚力急剧减小,但当土壤处于高含水量时,抗剪强度和粘聚力的波动不明显。这与本文得出的结论相吻合。

含水量变化对内摩擦角的消减作用甚微(图2B和表3),这是导致抗剪强度对含水量的敏感系数偏小的另一个原因。由于黄土的内摩擦角主要取决于土的矿物成分,在干密度不变时,内摩擦角随含水量发生变化的范围较小,一般不超过 $\pm 2^\circ$ ^[6]。此外,从表2,3可看出干密度对粘聚力和内摩擦角都产生显著的影响,且其影响程度均比含水量的大。粘聚力和内摩擦角对干密度的敏感系数分别是它们对含水量的敏感系数的5.6倍和55倍,同时抗剪强度对干密度的敏感性大于其对含水量的敏感性。王林浩等^[21]发现粘聚力和内摩擦角随干密度变化的趋势线比粘

聚力和内摩擦角随含水量变化的趋势线陡。这进一步证明了上述结果的合理性。笔者在六道沟小流域的现场试验^[22]中也发现,在同一场暴雨后,在同一沟坡的不同位置,虽然含水量、坡度、坡高等条件差别不大,但是如果某部位土壤越密实(对应的干密度大),则该部位重力侵蚀量越小。这也说明了干密度对抗剪强度产生显著影响。

以上是导致抗剪强度对干密度的敏感系数大于抗剪强度对含水量的敏感系数的原因。本研究尝试使用了增长率分析法这一新方法来进行抗剪强度影响因素的敏感性分析。这种方法使我们能更深入的理解土体的抗剪强度机理,帮助我们识别出抗剪强度对含水量和干密度等因素的敏感性。此外土壤的抗剪强度是控制重力侵蚀的内在因素。因此本文研究结果可为黄土沟坡重力侵蚀的力学机理和水土保持其他领域研究提供参考依据。

5 结论

(1) 干密度是通过影响粘聚力和内摩擦角来影响抗剪强度,而含水量主要是通过影响粘聚力来影响抗剪强度。含水量对粘聚力的影响呈指数函数减小,而对内摩擦角影响很小(均值为 21.1°)。

(2) 干密度对粘聚力的影响大于其对内摩擦角的影响,前者的影响基本是后者的2倍;含水量对粘聚力的影响也大于其对内摩擦角的影响,前者的影响是后者的18.5倍。粘聚力对干密度和含水量的敏感系数均值分别为4.18和-0.74,内摩擦角对干密度和含水量的敏感系数均值分别为2.20和-0.04。

(3) 黄土抗剪强度对干密度的敏感性大于抗剪强度对含水量的敏感性,前者的敏感性基本是后者的10倍。原因是含水量对内摩擦角的消减作用不明显及抗剪强度对高含水量的变化不敏感等。抗剪强度对干密度的敏感系数为2.76~3.35,抗剪强度对含水量的敏感系数为-0.43~-0.16。抗剪强度对干密度和含水量的敏感系数绝对值都随垂直压力的增大而减小。

参考文献:

- [1] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000(11): 11-12.
- [2] 王永吉, 杨明义, 张加琼, 等. 水蚀风蚀交错带小流域淤地坝泥沙沉积特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 1-5.
- [3] 陈晓安, 杨洁, 熊永, 等. 红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1175-1181.
- [4] Bomba J, Sedivka P, Boehm M, et al. Influence of

- moisture content on the bond strength and water resistance of bonded wood joints [J]. *Bioresources*, 2014, 9(3):5208-5218.
- [5] Tabibnejad A, Heshmati A, Salehzadeh H, et al. Effect of gradation curve and dry density on collapse deformation behavior of a rockfill material [J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2015, 19(3):631-640.
- [6] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. *水利学报*, 2001, 32(7):79-84.
- [7] Zhong Z, Liu Y, Liu X, et al. Influence of moisture content on shearing strength of unsaturated undisturbed quaternary system middle Pleistocene [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22:2776-2782.
- [8] 张文毅, 党进谦, 朱彭涛, 等. 重塑黄土强度试验研究[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(5):53-55.
- [9] 褚峰, 邵生俊, 陈存礼. 干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(2):413-420.
- [10] 王文龙, 李占斌, 李鹏, 等. 神府东胜煤田原生地面放水冲刷试验研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(S):59-62.
- [11] Wang G, Li T. Simulation of soil erosion in the Yellow River Basin [C]. *Proceedings of the 4th International Yellow River Forum on Ecological Civilization and River Ethics*, 2010.
- [12] Xu X, Liu Z, Wang W, et al. Which is more hazardous: avalanche, landslide, or mudslide [J]. *Natural Hazards*, 2015, 76:1939-1945.
- [13] 姜娜, 邵明安, 雷廷武, 等. 水蚀风蚀交错带典型土地利用方式土壤水分变化特征[J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(6):134-137.
- [14] 南京水利科学研究院. 中华人民共和国行业标准: 土工试验规程 SL237-1999[S]. 中国水利水电出版社, 1999.
- [15] Xu X, Liu Z, Xiao P, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity [J]. *Catena*, 2015, 135:231-239.
- [16] 肖培青, 姚文艺, 刘希胜, 等. 植被固土减蚀作用的力学效应[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):59-62.
- [17] 刘东生. 黄土的物质成分和结构[M]. 北京: 科学出版社, 1966.
- [18] 张永双, 曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. *工程地质学报*, 2005, 13(1):18-28.
- [19] 王中文, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 红黏土抗剪强度的水敏性研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2011, 43(1):17-22.
- [20] Adekalu K O, Okunade D A, Osunbitan J A. Estimating trafficability of three Nigerian agricultural soils from shear strength-density-moisture relations [J]. *International Agrophysics*, 2007, 21(1):1-5.
- [21] 王林浩, 白晓红, 冯俊琴. 压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S2):132-135.
- [22] Guo W Z, Xu X Z, Wang W L, et al. A measurement system applicable for landslide experiments in the field [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(4):044501.

~~~~~

(上接第22页)

- [13] Zhao G, Klik A, Mu X, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2015, 241:343-352.
- [14] Zhang X, Walling D E, He X, et al. Use of landslide-dammed loesslike deposits and pollen tracing techniques to investigate the erosional response of a small drainage basin in the Loess Plateau, China, to land use change during the late 16th century [J]. *Catena*, 2009, 79(3):205-213.
- [15] 杨明义, 徐龙江. 黄土高原小流域泥沙来源的复合指纹识别法分析[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2):30-34.
- [16] 薛凯, 杨明义, 张凤宝, 等. 利用淤地坝泥沙沉积旋回反演小流域侵蚀历史[J]. *核农学报*, 2011, 25(1):115-120.
- [17] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. *地理研究*, 2002, 21(3):384-390.
- [18] 霍洛特, 谭锦维. 农业生产效果预测[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [19] 郭畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(2):296-302.
- [20] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3):139-151.
- [21] Kaushal S, Binford M W. Relationship between C : N ratios of lake sediments, organic matter sources, and historical deforestation in Lake Pleasant, Massachusetts, USA [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22(4):439-442.
- [22] Brenner M, Binford M W. A sedimentary record of human disturbance from Lake Miragoane, Haiti [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1988, 1(2):85-97.
- [23] Melenevskii V N, Leonova G A, Konyshov A S. The organic matter of the recent sediments of Lake Beloe, West Siberia (from data of pyrolytic studies) [J]. *Russian Geology & Geophysics*, 2011, 52(6):583-592.